

## Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга

© Д.А. Локтев, А.Н. Алфимцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Распознавание движущихся объектов и измерение расстояния до них являются необходимыми опциями систем видеомониторинга, используемых для обеспечения безопасности на автомобильных дорогах, парковочных местах и вблизи крупных инфраструктурных объектов транспорта. В работе рассматриваются известные способы распознавания статических и движущихся объектов с помощью стереозрения. Приводятся связанные с этим проблемы и возможные пути их решения, на основе чего определенным образом модифицируются имеющиеся алгоритмы и методики. Предлагается использовать метод определения расстояния до распознаваемого объекта по изображениям, полученным с помощью стереопары, с учетом известных размеров реального объекта. Представлены зависимости погрешностей определения расстояния до цели от различных параметров, таких как расстояние между камерами, ошибки определения угла соосности камер. Показаны границы применимости метода в зависимости от размеров объектов и искомого расстояния до них. Проведен модельный эксперимент для движущегося объекта с учетом сохранения требуемых пропорций размеров объекта и расстояния до него, а также скорости передвижения относительно пройденного пути в условиях небольшого помещения.*

**Ключевые слова:** видеомониторинг, стереозрение, движущийся объект, определение расстояния.

**Введение.** В настоящее время находит широкое применение система комплексного видеомониторинга с элементами искусственного интеллекта и процедурами автоматизированного принятия решений, одними из основных компонентов таких комплексов являются модули получения изображений, распознавания отдельных объектов на нем [1], управления параметрами системы для наилучшего распознавания [2] и дальнейшего принятия решения о доступности объекту тех или иных возможностей. Такие системы получили широкое распространение в области комплексной безопасности, автоматической обработки графических данных, систем обнаружения нарушений правил дорожного движения и т.д.

При моделировании систем распознавания и комплексного видеомониторинга были удачно решены многие вопросы по распознаванию статических и движущихся объектов [3], лиц людей, номеров автотранспортных средств, по прогнозированию поведения отдельных объектов и направления их дальнейшего перемещения. Но вместе со значительными успехами существуют вопросы, требующие проведения дополнительных исследований, одним из таких вопросов является

определение расстояния до распознаваемого объекта, что позволяет не только создавать глубины изображения, но также и определять скорости движущегося объекта, скорости сближения объектов, открывает дополнительные возможности по прогнозированию траектории движения.

В работе [4] проводится достаточно подробный анализ методов получения трехмерного изображения по видеоряду или серии изображений, основной идеей при этом является совмещение изображений и последующее определение расстояния до объектов по расхождению их образов на фотографии. Здесь приводится классификация алгоритмов сопоставления двух изображений, полученных системой пассивного стереозрения, основными критериями классификации является схожесть окрестности вокруг сравниваемых точек (для этого вычисляется функция расхождения) и способ минимизации энергии, при этом выделяются методы динамического программирования и нахождения минимального разреза графа.

В [5] авторы рассматривают алгоритмы обработки изображений, полученных с двигающихся видеокамер, для определения препятствий на пути движения. Предлагается полученные изображения сравнивать с некоторыми шаблонными с помощью функций библиотеки Open CV, которая также использовалась в [6] для распознавания лиц людей. В статье [5] построен алгоритм, основанный на представлении кадров видеоизображений с двух камер в виде трех слоев: по оттенкам, яркости и насыщенности (модель HSV). В каждом слое выделяются реперные области, после чего они объединяются в одну картинку и происходит поиск шаблонных препятствий, заданных в базе системы распознавания. Разработке системы обнаружения препятствий перед мобильным объектом посвящена и работа [7], в которой предлагается метод обнаружения трехмерных объектов по стереоскопическим изображениям с двух камер. В полярной системе координат определяются ортогональные проекции стереоизображения на гладкие поверхности, при этом трехмерная задача сводится к плоской задаче обнаружения на синтезированных проекциях яркостно-геометрической структуры известной формы. Авторы [7] предлагают вначале получить аналитическую модель подстилающей поверхности, на которую затем будут проецироваться изображения левой и правой видеокамер. При наличии трехмерного объекта появляются отклонения от модели поверхности, при наложении двух изображений образуются угловые структуры, поэтому задача сводится к нахождению на дифференциальном ортофото структур определенной формы. Интересным новшеством, предложенным в данном исследовании, является переход от двухмерного анализа изображений к анализу одномерных массивов проекций яркости, которая изменяется на границах ортофото.

Котюжанский в работе [8] формулирует скоростной метод определения карты глубины стереоизображения таким образом, чтобы каждый пиксель графической информации содержал значение расстояния до камеры, которое затем будет обрабатываться специальным графическим процессором. Для генерирования информации о глубине изображения используются пассивные методы сопоставления изображений, полученных с двух камер. В качестве параметра сопоставления используется расстояние между точками одного объекта на двух изображениях, определяемое методом «скользящего окна». Данный метод включает построение градиентных изображений с помощью свертки, вычисление линейной комбинации градиентного и исходного кадра, после этого из всех значений модуля разности выбранного и подбираемого пикселя выбирается минимальное значение, соответствующее координатам подбираемого пикселя. В [8] на основании описанной методики был разработан вычислительный модуль определения глубины изображения за интервалы времени от 10 до 40 миллисекунд, что позволяет идентифицировать не только лицо человека, но и его жесты.

Несмотря на существенные достижения в области распознавания объектов и детектирования их параметров, многие вопросы реализации математических методов в виде программно-аппаратных комплексов являются недостаточно изученными. Это связано в первую очередь с частым представлением общей проблемы в виде двух частей: математической и программно-аппаратной, а при сращивании алгоритмов происходит уменьшение точности в определении параметров целей и увеличение ошибок из-за различных несовместимостей [9]. Данная работа посвящена разработке методики, включающей модуль математического моделирования, программной обработки данных и аппаратной реализации в виде конечного комплекса из двух видеокамер и программного приложения, обрабатывающего полученные изображения.

Первая часть исследования посвящена изучению методов математического моделирования для распознавания объектов и определения расстояния до них, для этого предлагается использовать стереопару.

**Метод определения по изображениям, полученным с помощью стереозрения.** Является одним из вариантов определения расстояния до требуемого объекта является. Метод предполагает использование двух идентичных камер с определенным расстоянием между ними, которое называется базой.

В случае двух идентичных камер с параллельными оптическими осями расстояние до точки определяется как

$$r_i = \frac{fd}{x_1 - x_2}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние;  $d$  – расстояние между камерами;  $x_1$  и  $x_2$  – координаты проекций на левом и правом изображениях [3].

Для более удобного практического применения формулы (1) представим ее в виде

$$r_n = \frac{dH}{\operatorname{tg}\alpha(x_1 - x_2)}, \quad (2)$$

где  $d$  – база (расстояние между камерами);  $H$  – горизонтальное разрешение изображения;  $\alpha$  – угол обзора камеры;  $x_1$  и  $x_2$  – координаты точки, до которой определяется расстояние, в координатной системе отсчета первой и второй камеры соответственно.

Для возможности использования формулы (2) считается, что изображения, получаемые с камер, ректифицированы, т. е. камеры расположены так, что в их координатных системах отсчета координаты точки, до которой требуется определить расстояние,  $y_1$  и  $y_2$  равны, это означает, что горизонтальные линии на изображениях соответствуют одной плоскости.

Трудности использования данного способа заключаются в сложности правильной установки двух камер: оси камер должны быть параллельны друг другу, а также перпендикулярны линии, соединяющей центры камер. Вследствие неправильной установки камер может получиться очень существенная неточность измерения (разница в один градус может привести к погрешности более чем в два раза). Для уменьшения погрешности предлагается увеличить базу до расстояния того же порядка, что и измеряемое [1]. Но, учитывая условия нашей работы, где планируется создание единого прибора, в рамках которого должны находиться камеры, это представляется невыполнимым, поэтому предлагается введение калибровочного коэффициента, который будет учитывать расхождение между реальным расстоянием и получаемым по формуле (2).

Для устранения таких проблем возможно использование в алгоритме методов ректификации изображений [2], но это приводит к серьезному усложнению алгоритма.

Из условия, чтобы чувствительность определения расстояния была высокой (т. е., чтобы изменение разности пикселей на единицу приводило к изменению определяемого расстояния не более чем на 5 %), можно определить, начиная с какой разности пикселей следует применять формулу (2):

$$\begin{aligned} r_1 - r_2 &= 0,05r_1; \\ \frac{0,95dH}{\operatorname{tg}\alpha\Delta x_1} &= \frac{dH}{\operatorname{tg}\alpha\Delta x_2}; \\ \Delta x_1 &= 0,95\Delta x_2; \end{aligned}$$

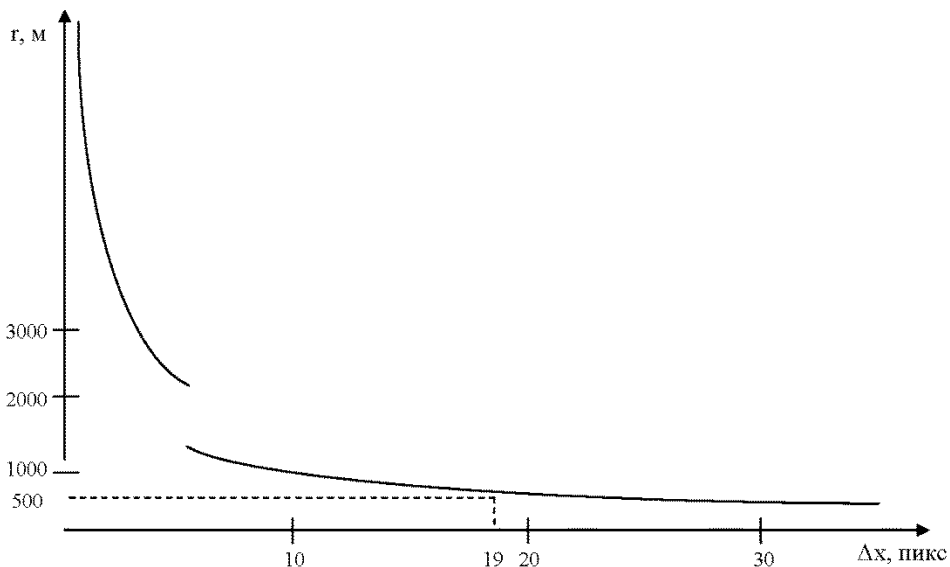
Учитывая, что  $\Delta x_2 = \Delta x_2 + 1$ , получаем  $\Delta x_1 = 19$ .

Это означает, что, начиная с разности пикселей двух изображений, равной 19, возможно применять метод определения расстояния до объекта с помощью стереовидения.

Для того чтобы можно было определить расстояние вплоть до 500 м при угле обзора одной камеры  $\alpha = 13^\circ$  и горизонтальном разрешении изображения, равном 1920 пикселей, вычислим по формуле (2) базу  $d$ :

$$d = \frac{r_H \operatorname{tg} \alpha \cdot (x_1 - x_2)}{H} = \frac{500 \cdot \operatorname{tg} 13^\circ \cdot 19}{1920} = 1,14 \text{ м.}$$

На рис. 1 показана зависимость расстояния до исследуемого объекта от разности между изображениями, полученными с двух стереокамер.



**Рис. 1.** Зависимость расстояния до объекта от разности пикселей между изображениями объекта с двух камер

**Способ измерения расстояния по ширине объекта на изображении.** Если известны реальные размеры объекта (его высота или ширина), то с помощью формулы (2) можно определить расстояние до него. Недостатком этого способа является то, чувствительность способа зависит от его размеров, т. е. чем меньше объект, тем с меньшей точностью определяется расстояние, вследствие чего расстояние до малогабаритных объектов будет определяться с большой погрешностью.

В данной работе для нахождения расстояния предлагается использовать сочетание способа определения расстояния с помощью стереозрения с получением начального расстояния до объекта по его известной ширине на изображении.

Определим в первоначальный момент времени расстояние до объекта, реальные размеры которого известны по формуле (2), затем найдем калибровочный коэффициент из формулы (3) путем подстановки в данную формулу значения расстояния, найденного с учетом того, что ширина объекта известна, и с помощью стереозрения. После этого каждое вновь полученное значение с помощью стереопары приводится калибровочным коэффициентом к искомому значению – реальному расстоянию до объекта:

$$r = \frac{r'_H}{k}. \quad (3)$$

Без учета в начальный момент времени размеров (ширины) объекта способ стереозрения может работать некорректно в связи с неточностью установки стереосистемы, поэтому и вводится калибровочный коэффициент, посредством которого убирается расхождение получаемых с помощью данного метода расстояний и реальных величин.

Размеры объекта, до которого требуется измерить расстояние, узнаем, используя любой из возможных методов распознавания, например с помощью оптического потока методом Лукаса – Канаде [10], а для метода стереозрения будем измерять расстояние не до всех точек, принадлежащих объекту, а только до центра масс объекта.

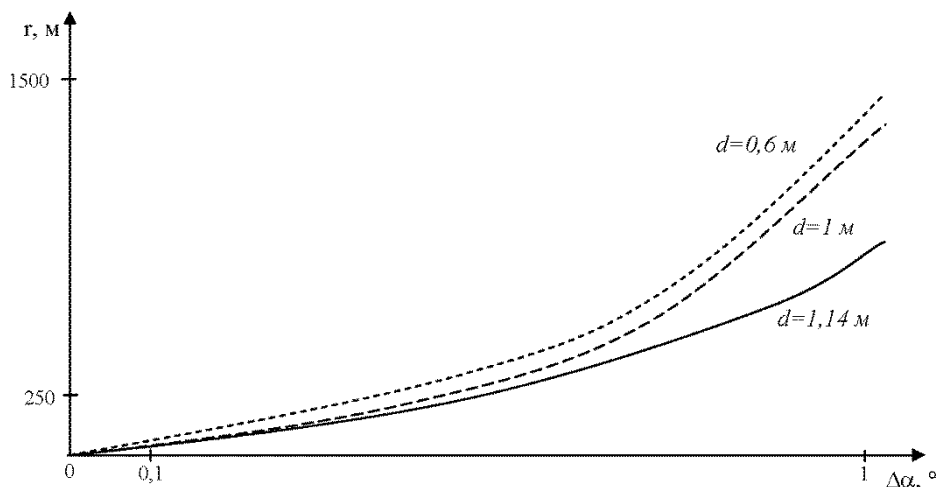
Данный метод возможно применять только для наблюдения за такими объектами, чьи размеры меньше, чем база стереопары.

Важной задачей определения параметров движущегося объекта является задача определения погрешности измерения и интервалов применимости предлагаемой методики. На рис. 2 представлена зависимость ошибки определения положения объекта от погрешности определения угла между камерами стереопары при различных величинах базы (0,60 м, 1,00 м, 1,14 м). Объект находится на расстоянии 500 м. Ошибка в один градус приводит к неточности в 150–300 %.

Погрешность данного метода будет зависеть от: погрешности нахождения первоначального расстояния, найденного при помощи пропорции, погрешности способа стереозрения (чувствительности способа – чем ближе будет объект, тем меньшее изменение расстояния происходит при изменении разности пикселей изображений на единицу), а также от погрешности метода распознавания объекта, то есть возможности точного выделения его границ.

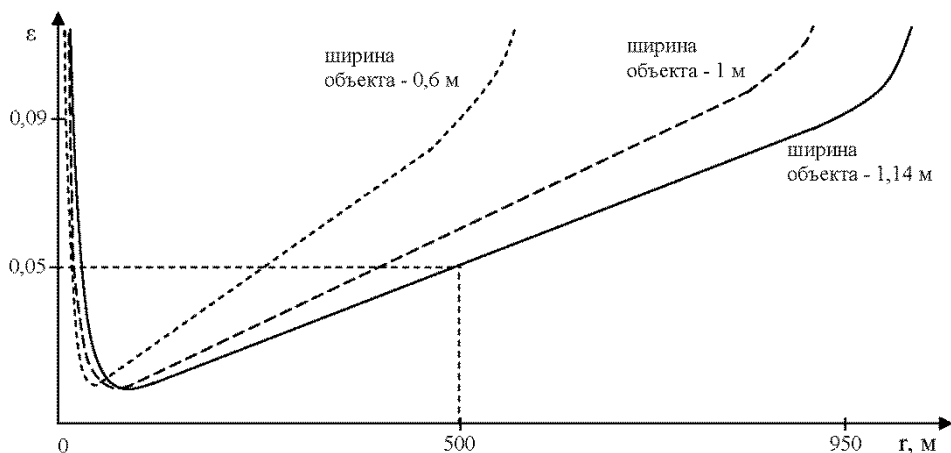
Зависимость ошибки измерения расстояния методом стереозрения от расстояния до объекта:

$$\varepsilon = \frac{r_{i+1} - r_i}{r_{i+1}}. \quad (4)$$



**Рис. 2.** Зависимость погрешности определения положения объекта от ошибки определения угла между осями камер (при величине стереобазы 0,60 м, 1,00 м, 1,14 м)

Получается, что для объекта, ширина которого меньше чем база стереопары, предлагаемый метод будет точнее, чем метод пропорции при прочих равных величинах: угле обзора, разрешении изображения (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость погрешности метода стереозрения от расстояния до объекта для различных геометрических размеров изучаемой цели

Следовательно, данный метод целесообразно использовать для измерения расстояния до малогабаритных объектов, находящихся на больших дистанциях (в нашем примере – до 500 м).

На рис. 4 представлен результат работы программно-аппаратного комплекса по распознаванию движущегося объекта (машинка с дистанционным управлением), созданного на основе двух видеокамер и программного модуля, который реализует описанные выше процеду-

ры сравнения двух синхронно полученных изображений. При реальном расстоянии до объекта 5,20 м, комплекс определял расстояние от 4,5 до 5,0 метров, всего было сделано десять измерений. Задний фон не подбирался специальным образом, и область тени между тумбой и полом сливалась с цветом самого объекта, в ходе эксперимента специально не создавались наилучшие условия для распознавания и детектирования, поэтому результаты работы комплекса, учитывая одно из первых приближений методики, можно признать хорошими.

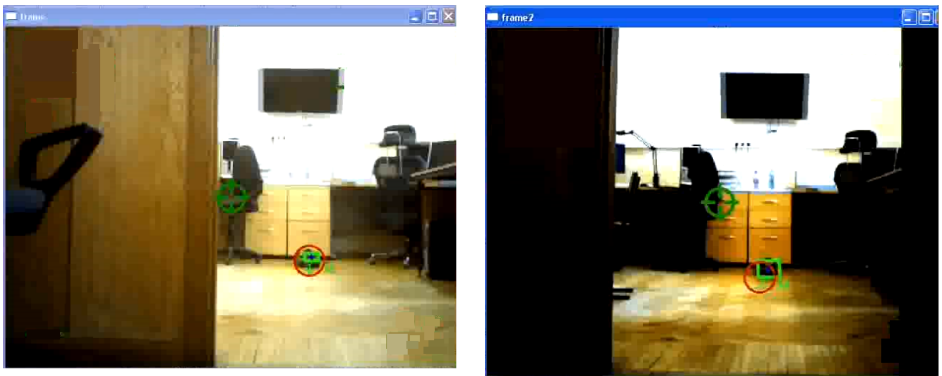


Рис. 4. Распознавание движущегося объекта на изображениях, получаемых со стереопары

Поскольку проводимое исследование предполагает влияние на конечные результаты обработки изображений большого количества различных факторов, то для формулировки полноценных и однозначных выводов о применимости данной методики в разных условиях проведения съемки и рекомендаций по интервалам допустимых невязок в зависимости от расстояния от камеры до объектов, необходимо выполнить множество моделирований и компьютерных экспериментов, чтобы набрать необходимую статистику. После этого методами статистической обработки данных наборы полученных измерений обрабатываются и выявляются границы оптимального использования предложенного алгоритма, в качестве одного из параметров оценки можно использовать характеристическую функцию случайного процесса. Данная величина представляет собой преобразование Фурье от плотности вероятности. Поскольку результаты измерения расстояния зависят от нескольких основных процессов, то целесообразно применять многомерную характеристическую функцию:

$$\theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{j \sum_{k=1}^n u_k x_k} w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) dx_1 \dots dx_n, \quad (5)$$

где  $\theta_n(u_1, \dots, u_n; t_1, \dots, t_n)$  – характеристическая функция;  
 $w_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n)$  – плотность вероятности.



С помощью статистического подхода в обработке результатов измерений можно решать обратную задачу верного (или, наоборот, неправильного) определения расстояния с некоторым допуском и определить управляемые параметры съемки, на которые оператор непосредственно может повлиять.

Проведенные исследования включают в себя теоретическую и экспериментальную часть. Результаты математического моделирования процесса стереораспознавания позволили спрогнозировать расстояние до определяемого объекта по количеству различающихся пикселей с двух синхронных изображений, вычислить зависимость точности определения положения изучаемого объекта от первоначальной ошибки во взаимном ориентировании камер. В работе также определена зависимость погрешности метода стереозрения в определении расстояния до изучаемого объекта для различных его горизонтальных размеров. Достаточно четко определены границы применимости предлагаемой методики в зависимости от размеров цели и расстояния до нее, на полученных рисунках границы видны по резкому переходу от прямого участка функции к экспоненциальной с жесткой характеристикой нелинейности (достаточно резкое возрастание погрешности при небольшом увеличении расстояния). Допустимые интервалы определяются протяженностью линейных участков и частей сегментов закругления в местах резкого изменения первой производной функции ошибки. Построенные графики также позволяют провести горизонтальную прямую, соответствующую нормированной (заданной) ошибке, и определить точно размеры цели и расстояние до нее, при которых возможно практическое использование реализованного алгоритма в реальных условиях. Проведенный модельный эксперимент по изучению перемещающегося объекта в помещении при сохранении основных отношений размеров объекта к расстоянию до него и скорости его перемещения к пройденному пути, позволяет на практике проверить работу предложенной методики, идентифицироватьдвигающийся объект и с точностью до 90–95 % определить расстояние до него. В дальнейшем предполагается усовершенствовать математический и программный аппарат для увеличения точности детектирования объекта и возможности использования спроектированного комплекса в реальных задачах обеспечения безопасности и соблюдения ПДД на автомобильных дорогах и вблизи крупных инфраструктурных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколов С.М., Богуславский А.А., Васильев А.И., Трифонов О.В., Назаров В.Г., Фролов Р.С. Мобильный комплекс для оперативного создания и обновления навигационных карт. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2011, т. 116, № 3, с. 157–166.

- [2] Протасов С.И., Крыловецкий А.А., Кургалин С.Д. Об одном подходе к решению задачи ректификации по сцене без калибровки камер. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2012, т. 131, № 6, с. 144–148.
- [3] Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Система технического зрения для измерения пути мобильного робота. *Механика, управление и информатика*. 2012, № 8, с. 219–224.
- [4] Вахитов А.Т., Гуревич Л.С., Павленко Д.В. Обзор алгоритмов стереозрения. *Стохастическая оптимизация в информатике*, 2008, т. 4, № 1-1, с. 151–169.
- [5] Быков С.А., Еременко А.В., Гаврилов А.Е., Скакунов В.Н. Адаптация алгоритмов технического зрения для систем управления шагающими машинами. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2011, т. 3, № 10, с. 52–56.
- [6] Локтев А.А., Алфимцев А.Н., Локтев Д.А. Алгоритм распознавания объектов. *Вестник МГСУ*, 2012, № 5, с. 194–201.
- [7] Vygolov O.V., Zheltov S.Yu., Vizil'ter Yu.V. Mobile robot stereovision system for real-time obstacle detection. *Механика, управление и информатика*, 2011, № 6, с. 202–215.
- [8] Котюжанский Л.А. Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени. *Фундаментальные исследования*, 2012, № 6, с. 444–449.
- [9] Devyatkov V., Alifimtsev A. Optimal fuzzy aggregation of secondary attributes in recognition problems. *16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG'2008 – In Cooperation with EUROGRAPHICS, Full Papers*, 2008, с. 33–39.
- [10] Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. of Imaging Understanding Workshop*, 1981, pp. 121–130.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 11. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html>

**Локтев Даниил Алексеевич** — аспирант факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более десяти научных публикаций. Область научных интересов: методы искусственного интеллектора распознавание образов. e-mail: [loktevdan@yandex.ru](mailto:loktevdan@yandex.ru).

**Алфимцев Александр Николаевич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных публикаций, в том числе пяти охранных документов на интеллектуальную собственность. Область научных интересов: методы искусственного интеллекта, мультимодальные интерфейсы, распознавание образов. e-mail: [alfim@bmstu.ru](mailto:alfim@bmstu.ru)